

1 – до ГРП ; 2 – после ГРП
Рисунок 1- Индикаторная диаграмма

Профили отражают картину распределения притока нефти или приёмистости воды по толщине продуктивного пласта (или по перфорированной толщине пласта в обсаженных скважинах). По профилям определяют так называемые коэффициенты охвата пласта притоком в добывающих скважинах или охвата пласта заводнением в водонагнетательных скважинах. Коэффициент охвата – отношение толщины пласта, охваченной притоком или заводнением, ко всей толщине продуктивного пласта.

Если коэффициент охвата увеличивается после проведённого ГРП, то ГРП считается эффективным. Данные о коэффициентах охвата пласта притоком или заводнением используются при анализе разработки месторождений с целью оценки характера и степени выработки продуктивных пластов.

Технологический эффект гидроразрыва пласта оценивается сопоставлением производительных и гидродинамических характеристик скважин и пластов до и после проведения ГРП. Для этого после

проведения ГРП в скважинах проводятся комплексные термо – гидродинамические исследования, результаты которых позволяют не только оценить эффективность этого технологического процесса, но и решить вопрос о целесообразности проведения мероприятий по воздействию на призабойную зону пласта, с целью повышения продуктивности скважин.

Список использованных источников

1. Басниев, К.С., Подземная гидромеханика : учебник для вузов по направлению "Нефтегазовое дело" / К. С. Басниев, и др. . – М. : Ин-т компьютер. исслед., 2005 . – 496 с.
2. Назарова, Л.Н, Теоретические основы разработки нефтяных и нефтегазовых месторождений./Л.Н.Назарова, М.: Изд-во РГУ нефти и газа им.И.М.Губкина.-2006. 444 с.

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ В ТЯГОВОМ АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ПИТАНИЯ

Рябов Евгений Сергеевич,

старший научный сотрудник, кандидат технических наук, ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ «ЗАВОД «ЭЛЕКТРОТЯЖМАШ», Харьков, заместитель заведующего отделом тяговых электрических машин

Петренко Александр Николаевич,

кандидат технических наук, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, Харьков, доцент кафедры электрического транспорта.

Оверьянова Лилия Викторовна,

доцент, кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры электрического транспорта и тепловозостроения.

В современном тяговом приводе для питания асинхронного тягового двигателя применяются два

режима работы автономного инвертора напряжения – режим однократной широтно-импульсной

модуляции (ШИМ), при больших скоростях вращения и пространственно-векторной ШИМ, при пуске и малых скоростях. Эффективность тягового привода в определенном режиме его работы оценивать по критерию максимума его КПД при условии соблюдения требований, налагаемых режимами работы. Поэтому задача определения эффективности тягового привода сводится к нахождению максимума функции КПД привода, а следовательно потерь в его составляющих одной из которых является тяговый двигатель.

Цель работы: разработать методику определения потерь в асинхронном тяговом двигателе с учетом нелинейности магнитной системы. Методы: методы расчета нелинейных электрических цепей, одномерная минимизация функции невязки на базе метода «деления пополам», методы общей теории электрических машин. Рассмотрены основные подходы по определению потерь в тяговом асинхронном двигателе при питании его от полупроводникового преобразователя в режимах однократной и пространственно-векторной ШИМ, позволяющие

оптимизировать режимы работы тягового асинхронного привода по критерию минимальных потерь с учетом теплового состояния двигателя.

Основные потери в тяговом асинхронном двигателе.

Потери в тяговом двигателе состоят из основных потерь $P_{осн}$, суммарных потерь в меди и стали от токов высших гармоник $\sum P_{mi}$, $\sum P_{sti}$, добавочных потерь $P_{доб}$, и механических потерь $P_{МЕХ}$

$$P_{\partial в} = P_{осн} + \sum P_{mi} + \sum P_{sti} + P_{доб} + P_{МЕХ}.$$

Основные потери в тяговом двигателе:

$$P_{осн} = P_{m1} + P_{m2} + P_{st}.$$

где P_{m1} – потери в меди статора, P_{m2} – потери в меди ротора, P_{st} – потери в стали.

Для определения основных потерь в различных режимах работы асинхронного тягового двигателя рационально использовать схему замещения, представленную на рис.1 [2,3,5].

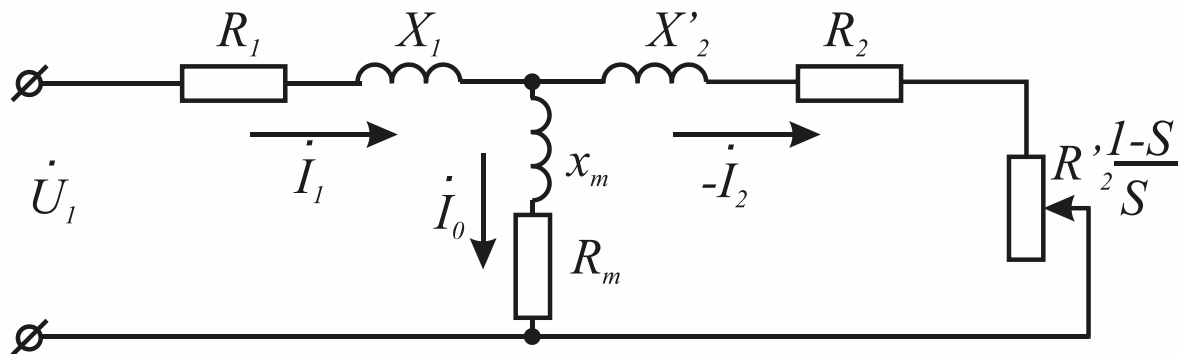


Рисунок 1 – Схема замещения фазы асинхронного двигателя

Согласно этой схеме потери в меди статора одной фазы эквивалентны потерям в активном сопротивлении R_1 , приведенное сопротивление ротора

R'_2 , а стали – R_m , следовательно:

$$P_{осн} = P_{m1} + P_{m2} + P_{st}, P_{m1} = m I_1^2 R_1, P_{m2} = m I_2^2 R'_2, P_{st} = m I_0^2 R_m,$$

где m – число фаз двигателя; I_1 , I'_2 , I_0 – токи схемы замещения: статора, приведенный ротора и цепи намагничивания соответственно.

Кроме того, схема замещения позволяет определить величину фазного тока и коэффициент мощности, необходимые для расчета потерь в преобразователе.

Фазный ток двигателя в комплексном виде определяется выражением

$$Z_{\Sigma} = R_1 + jX_1 + \frac{(R_m + jX_m) \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right)}{\left(R_m + \frac{R'_2}{s} \right) + j(X_m + X'_2)}.$$

$$I_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z},$$

где Z_{Σ} – суммарное комплексное сопротивление фазы двигателя; \dot{U}_1 – фазное напряжение двигателя в комплексном виде

Коэффициент мощности двигателя

$$\cos \varphi = \frac{\operatorname{Re}(S_1)}{|S_1|},$$

где S_1 – полная мощность потребляемая тяговым двигателем

$$S_1 = m \dot{U}_1 I_1^*,$$

где I_1 – сопряженный фазный ток статора.

Идентифицируем параметры схемы замещения АТД.

Активное сопротивление фазы обмотки статора:

$$R_1 = \frac{l_{\omega 1} w_1}{q_{a1} 57} t_r,$$

где $l_{\omega 1}$ – длина витка обмотки статора, w_1 – число витков обмотки статора, t_r – коэффициент учитывающий изменение активного сопротивления от температуры:

Активное сопротивление фазы беличьей клетки, приведенное к статору

$$R_2' = R_2 k_r,$$

где R_2 – активное сопротивление фазы беличьей клетки, k_r – коэффициент приведения сопротивления статора к ротору, определяемый соотношением

$$k_r = \frac{m(w_1 \kappa_{o\delta 1})^2}{0,25 Z_2},$$

где $\kappa_{o\delta 1}$ – обмоточный коэффициент 1-й гармоники обмотки статора, Z_2 – число пазов ротора

$$R_2 = R_{cm} + R_{\kappa l}' ,$$

где R_{cm} – активное сопротивление стержня обмотки ротора, $R_{\kappa l}'$ – активное сопротивление части короткозамыкающего, кольца которые определяются соотношениями [6]:

$$R_{cm} = \frac{l_{\omega 2}}{57 q_{a2}} t_r,$$

$$R_{\kappa l}' = \frac{2 l_{\kappa l}}{57 q_{\kappa l}} \cdot \frac{t_r}{4 \sin^2 \left(\frac{p \pi}{Z_2} \right)},$$

где $l_{\omega 2}$ – длина стержня ротора, q_{a2} – поперечное сечение стержня, $l_{\kappa l}$ – длина короткозамыкающего P – число пар полюсов [6].:

Коэффициент, учитывающий изменение активного сопротивления от температуры [9]

$$t_r = [1 + 0,004 (t_{3a0} - 20)].$$

Как видно из приведенных выше соотношений активное сопротивление статора и приведенное активное сопротивление ротора зависят от геометрических параметров двигателя и от рабочей температуры двигателя и не зависят от частоты тока статора и ротора.

Индуктивное сопротивление статора [6]

$$x_1 = 1,58 \cdot 10^{-8} f_1 l w_1^2 \lambda_1 / (p q_1),$$

где f_1 – частота питания статора, l – длина пакета статора.

Здесь

$$\lambda_1 = \lambda_{n1} + \lambda_{\delta 1} + \lambda_{\lambda 1},$$

где λ_1 – коэффициент магнитной проводимости рассеяния обмотки статора; λ_{n1} , $\lambda_{\delta 1}$ и $\lambda_{\lambda 1}$ – коэффициенты магнитной проводимости пазового, дифференциального и лобового рассеяния статора.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора определяется выражениями, зависящими от типа обмотки ротора. Для короткозамкнутой обмотки при неподвижном роторе:

$$x_2 = 7,9 \cdot 10^{-9} f_1 l_{i2} \lambda_2.$$

Здесь

$$\lambda_2 = \lambda_{n2} + \lambda_{\delta 2} + \lambda_{\kappa l} + \lambda_{\sigma k},$$

где λ_2 – коэффициент магнитной проводимости рассеяния короткозамкнутой обмотки ротора: λ_{n2} , $\lambda_{\delta 2}$, $\lambda_{\kappa l}$ и $\lambda_{\sigma k}$ – коэффициенты магнитной проводимости рассеяния пазового, дифференциального, короткозамыкающих колец и скоса пазов короткозамкнутого ротора.

Коэффициенты магнитной проводимости зависят от геометрии пазовой части и конструкции обмотки. Они определяются по зависимостям приведенных в [1].

Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора:

$$X_2' = X_2 k_r,$$

Как видно из рассмотренных соотношений индуктивные сопротивления прямо пропорциональны частоте статора и не зависят от температуры двигателя.

Активное сопротивление цепи намагничивания определяет потери в стали двигателя и равно:

$$R_m = \frac{P_{st}}{m I_0^2}.$$

Потери в стали определяются выражением [6]

$$P_{st} = \left(\frac{2,85 p_{1/50}}{50^{1,5}} \left(\frac{m_a}{4S_a^2} + \frac{m_z}{4S_z^2} \right) \right) \Phi_1^2 f_1^{1,5},$$

где $p_{1/50}$ – удельные потери в стали, B_a, B_{z1} – индукции в спинке и зубцах статора соответственно, m_a – масса стали спинки статора, m_z –

масса зубцов статора, S_a, S_z – сечение спинки и зубцов статора, Φ_1 – магнитный поток статора

$$R_m = 2,052 \cdot 10^{-9} \frac{p_{1/50} \left(\frac{m_a}{4S_a^2} + \frac{m_z}{4S_z^2} \right) m S_\delta^2 k_{obl}^2 w_1^2}{p^2 k_{нас}^2 k_\delta^2 \delta^2} f_1^{1,5},$$

где $k_{obl}, k_{нас}, k_\delta$ – коэффициенты обмоточный, насыщения и воздушного зазора соответственно.

Активное сопротивление цепи намагничивания пропорционально $f_1^{1,5}$.

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания [2]

$$X_m = 2,51 \cdot 10^{-6} \frac{m D_1 l w_1^2 k_{obl}^2}{p^2 k_{нас} k_\delta \delta} f_1,$$

где D_1 – диаметр расточки.

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания прямо пропорционально частоте тока статора.

Активное и индуктивное сопротивление цепи намагничивания зависят от коэффициента насыщения который определяется величиной основного магнитного потока.

Учитывая вышеприведенные выводы получим:

$$\begin{aligned} R_1 &= K_{r1} t_r, \quad X_1 = K_{x1} f_1, \quad R_2' = K_{r2} t_r, \quad X_2' = K_{x2} f_1, \\ R_m &= K_{rm} \frac{f_1^{1,5}}{k_{нас}^2}, \quad X_m = K_{xm} \frac{f_1}{k_{нас}} - X_1. \end{aligned} \quad (1)$$

Используя параметры номинального режима работы тягового двигателя, коэффициенты K_{r1}, K_{x1}

, $K_{r2}, K_{x2}, K_{rm}, K_{xm}$ можно определить по соотношениям:

$$\begin{aligned} R_{1ном} &= K_{r1} t_{гно}, \quad X_{1ном} = K_{x1} f_{1ном}, \quad R_{2ном}' = K_{r2} t_{гно}, \quad X_{2ном}' = K_{x2} f_{1ном}, \\ R_{mнно} &= K_{rm} \frac{f_{1ном}^{1,5}}{k_{насном}^2}, \quad X_{mнно} + X_{1ном} = K_{xm} \frac{f_{1ном}}{k_{насном}}, \end{aligned} \quad (2)$$

Выразив коэффициенты $K_{r1}, K_{x1}, K_{r2}, K_{x2},$

K_{rm}, K_{xm} из (1) и подставив их в (2) получим:

$$\begin{aligned} R_1 &= R_{1ном} t_r / t_{гно}, \quad X_1 = X_{1ном} f_1 / f_{1ном}, \quad R_2' = R_{2ном}' t_r, \quad X_2' = X_{2ном}' f_1 / f_{1ном}, \\ R_m &= R_{mнно} \frac{f_1^{1,5}}{k_{нас}^2} \frac{k_{насном}^2}{f_{1ном}^{1,5}}, \\ X_m &= \left((X_{mнно} + X_{1ном}) \frac{k_{насном}}{k_{нас}} - X_{1ном} \right) \frac{f_1}{f_{1ном}}. \end{aligned}$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи зависит от тока цепи намагничивания и определяется по результатам расчета магнитной цепи [2,3,4].

Ток намагничивания для каждого режима работы определяется по выражению

$$I_0 = I_1 \frac{\left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right)}{\left(R_m + \frac{R'_2}{s} \right) + j(X_m + X'_2)}$$

Таким образом рекуррентное уравнение для определения коэффициента насыщения имеет вид:

$$k'_{нас} = f(|I_0|),$$

$$I_0 = I_1 \frac{\left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right)}{\left(R_m + \frac{R'_2}{s} \right) + j(X_m + X'_2)}$$

(3)

$$I_1 = \frac{\dot{U}}{Z_\Sigma}, \quad Z = R_1 + jX_1 + \frac{(R_m + jX_m) \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right)}{\left(R_m + \frac{R'_2}{s} \right) + j(X_m + X'_2)},$$

$$R_1 = R_{1ном} t_r / t_{гнн}, \quad X_1 = X_{1ном} f_1 / f_{1ном}, \quad R'_2 = R_{2ном} t_r, \quad X'_2 = X'_{2ном} f_1 / f_{1ном},$$

$$R_m = R_{мнн} \frac{f_1^{1,5}}{k_{нас}^2} \frac{k_{насном}^2}{f_{1ном}^{1,5}}, \quad X_m = \left((X_{мнн} + X_{1ном}) \frac{k_{насном}}{k_{нас}} - X_{1ном} \right) \frac{f_1}{f_{1ном}}.$$

Для решения рекуррентного уравнения используется одномерная минимизация функции невязки [3,4,7] на базе метода «деления пополам»

$$\begin{cases} |k'_{нас} - k_{нас}| \rightarrow \min \\ k_{нас} \in [1;3] \end{cases}$$

Таким образом, основные потери в тяговом асинхронном двигателе можно определить, рассчитав параметры схемы замещения, при заданных

значениях частоты питания $f_1 = \frac{p n_{зад}}{60(1-s)}$, и

температуры обмоток $t_{зад}$. Затем определив токи I_0, I_1, I'_2 при заданных значениях скольжения s , и напряжении питания \dot{U} , можно определить основные потери в двигателе по (3).

Суммарные потери в меди от токов высших гармонических

При питании двигателя в режиме однократной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжение на выходе инвертора имеет вид, показанный на рис. 2.

Такая ступенчатая форма напряжения создает спектр высших гармоник напряжения вызывающих дополнительные потери в меди.

При использовании пространственно-векторной ШИМ амплитуды высших гармоник незначительны [8], и как следствие они не вызывают потерь в двигателе.

Частоты гармоник ротора по отношению к ротору 5-я и 11-я гармонические являются обратно вращающимися, а 7-я и 13-я – прямо вращающимися.

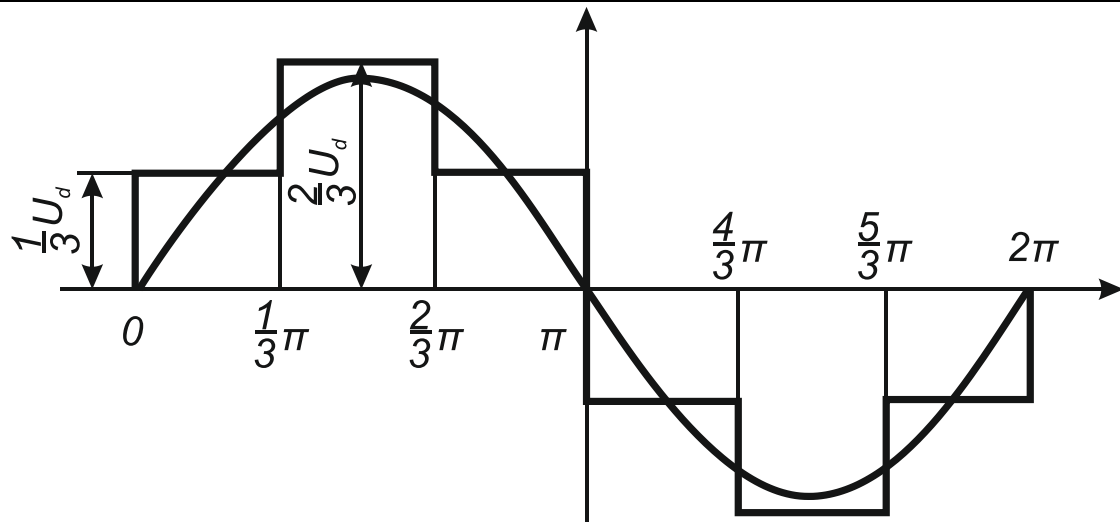


Рисунок 2 – Напряжение АТД в режиме однократной ШИМ

Следовательно, 5-я гармоническая имеет частоту относительно ротора:

$$f_{2(v)} = f_{2(5)} = 5f_1 + f_r = f_1(6-s),$$

где 7-я гармоника

$$f_{2(7)} = 7f_1 - f_r = f_1(6+s),$$

где 11-я гармоника

$$f_{2(11)} = 11f_1 + f_r = f_1(12-s),$$

где 13-я гармоника

$$f_{2(13)} = 13f_1 - f_r = f_1(12+s).$$

Схема замещения асинхронного двигателя для высших гармонических представлена на рис 3

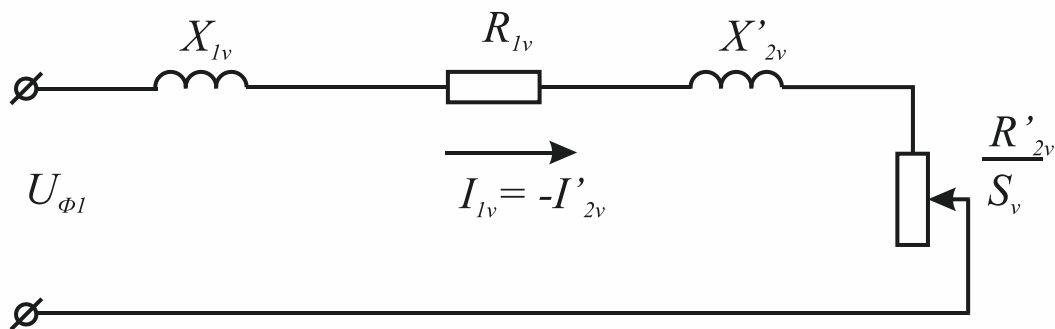


Рисунок 3 Схема замещения для определения высших гармонических токов

Идентифицируем параметры схемы замещения для v гармоники.

Активные сопротивления статора и ротора:

$$R_{1v} = R_1 k_{f1v}, \quad R'_{2v} = R'_2 k_{f2v}.$$

где k_{f1v} , k_{f2v} - коэффициенты Филда для статора и ротора, определяемые соотношением приведенным в [5]

Индуктивные сопротивления статора и ротора:

$$X_{1v} = v X_1 k_{x1v}, \quad X'_{2v} = v X'_2 k_{x2v},$$

где k_{x1v} , k_{x2v} - коэффициенты Филда для статора и ротора, определяемые соотношением приведенным в [5]

Относительное скольжение для 1, 7 и 13-й гармоник определяем по формуле:

$$s_v = \frac{n_1 v - n}{n_1 v},$$

для обратно вращающихся 5-й и 11-й

$$s_v = \frac{n_1 v + n}{n_1 v},$$

где n_1 - частота вращения поля статора,

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}.$$

Напряжение v гармоники

$$U_{\phi v} = \frac{U}{v}.$$

Ток v -ой гармоники

$$I_{\phi v} = \frac{U_{\phi v}}{\sqrt{\left(X_{1v} + X'_{2v}\right)^2 + \left(R_{1v} + \frac{R'_{2v}}{s_v}\right)^2}}$$

Потери в меди статора от v -ой гармоники тока:

$$\Delta P_{m1(v)} = m_1 I_{\phi 1v}^2 r'_{1v}$$

Потери в меди ротора от v -ой гармоники тока:

$$\Delta P_{m2(v)} = m_1 I_{\phi 1v}^2 \frac{r'_2}{s_v}$$

Суммарные потери в меди от токов высших гармоник с учетом пульсационных потерь

$$\sum P_{mi} = 1,7 \sum_{v=5,7,11,13} \Delta P_{m1(v)} + 2,5 \sum_{v=5,7,11,13} \Delta P_{m2(v)}$$

Потери в стали от высших гармонических

$$\sum P_{sti} = P_{st} \frac{G_1 + G_2}{G_1} \cdot \sum_{v=5;7;11;13}^{\infty} v^{-2,7} \approx 0,021 P_{st} \frac{G_1 + G_2}{G_1}$$

где G_1 G_2 – масса сердечника статора и ротора соответственно.

Добавочные потери

$$P_{доб} = 0,005 \text{Re}(S).$$

Механические потери

$$P_{MEX} = 0,002 \text{Re}(S).$$

Таким образом, мы имеем все составляющие потерь в асинхронном тяговом двигателе.

Выводы.

Рассмотрены основные подходы по определению потерь в тяговом асинхронном двигателе при питании его от полупроводникового преобразователя в режимах однократной и пространственно-векторной ШИМ, позволяющие оптимизировать режимы работы тягового асинхронного привода по критерию минимальных потерь с учетом теплового состояния двигателя.

Представлены соотношения позволяющие установить связь между, частотой вращения, напряжением питания, скольжением и температурой обмоток с составляющими потерь, как основными, так и добавочными, а также потерями от высших гармоник напряжения в режиме однократной ШИМ.

Установлены соотношения по определению основных потерь в асинхронном тяговом двигателе (в меди статора, в меди ротора, в стали) на основании расчета нелинейной схемы замещения.

Предложено рекуррентное уравнение для определения коэффициента насыщения магнитной цепи тягового двигателя.

Список литературы:

1. Копылов И.П. Проектирование электрических машин/ И.П. Копылов — М.: Энергия, 1980. — 495с.
2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Часть 2 Машины переменного тока [Изд 3 перераб]/ М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский — Ленинград: Энергия, 1973. — 648 с.
3. Любарский Б.Г. Теоретичні основи для вибору та оцінки перспективних систем електромеханічного перетворення енергії електродвигуна. — Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09. - «Електротранспорт». Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». Харків, - 2014. 368с.
4. Любарский Б.Г. Оптимизация режимов работы тягового асинхронного привода / Б.Г. Любарский // Электрика. Курск— 2014 — №6 — С5–10.
5. Находкин М.Д. Проектирование тяговых электрических машин [Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта, Изд. 2, перераб. и дополн.] / М.Д. Находкин — М.: Транспорт, 1976. — 624 с/
6. Проектирование электрических машин. / И.П. Копылов, Б.К. Горяинов и др.; Под. ред. Копылова. — М.: Энергия, 1980. — 496с.
7. Северин В. П. Методы одномерного поиска. / В.П. Северин, Е.Н. Никулина — Харьков: НТУ ХПИ, 2013. — 124 с.
8. Титяев Д.К. Сравнительный анализ векторной и традиционной широтно-импульсной модуляции/ Д.К. Титяев, Д.Н. Мирошник //мат конф. Автоматизація технологічних проєктів. Пошук молодих. ДонНТУ — 2004 —С. 301-306
9. Henneberger, G. Variable reluctance electrical machines/ G. Henneberger, I.A. Viorel — Shaker Verlag, Aachen, Germany, 2001.